中国生态农业学报 2017 年 7 月 第 25 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2017, 25(7): 1008−1015

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160951

武文明, 王世济, 陈洪俭, 崔权仁, 竟丽丽. 氮肥后移促进受渍夏玉米根系形态恢复和提高花后光合性能[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 1008−1015

Wu W M, Wang S J, Chen H J, Cui Q R, Jing L L. Postponed nitrogen application enhances root morphology recovery and photosynthetic characteristics of summer maize waterlogging stressed at seedling stage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 1008−1015

氮肥后移促进受渍夏玉米根系形态恢复和提高花后光合性能*

武文明, 王世济**, 陈洪俭, 崔权仁, 竟丽丽

(安徽省农业科学院烟草研究所/玉米研究中心 合肥 230031)

摘 要: 江淮地区受梅雨影响, 玉米苗期易发生渍害, 如何通过合理运筹氮肥达到减灾效果值得研究。以夏玉米品种'隆平 206'为试验材料, 研究不同氮肥运筹方式[氮肥全部基施(N1)、基肥 70%+拔节肥 30%(N2)、基肥 50%+拔节肥 50%(N3)和基肥 30%+拔节肥 50%+大喇叭口肥 20%(N4)]对苗期受渍夏玉米根系形态和花后光合性能恢复的影响, 以期为苗期受渍夏玉米合理施肥提供理论依据。结果表明, 苗期渍水 7 d 抑制根系生长, 根重、根长度、根表面积和根直径均显著降低, 渍水对根系形态指标抑制效应表现为: 根长度>根表面积>根直径。氮肥后移对渍水后根系生长有显著的补偿效应, 氮肥后移量增加, 根重、根长度和根表面积显著增加。渍水胁迫解除后 18 d, N1-N4 处理根长度较渍水前提高 1.9~5.1 倍, 根表面积提高 6.3~10.3 倍, 根直径提高 0.7~1.0 倍, 氮肥后移对根系形态指标补偿生长效应强弱表现为: 根表面积>根长度>根直径。渍水使群体叶面积系数降低 9.3%~22.5%, 氮肥后移可提高群体叶面积系数, 较全部基施处理提高 3.2%~20.7%。苗期渍水 7 d 显著降低灌浆期间穗位叶片的光合能力, 净光合速率下降, 灌浆中期和末期净光合速率分别下降 16.1%和 28.9%, 灌浆后期光合能力下降幅度高于对照, 非气孔限制是导致渍水胁迫下净光合速率下降的主要原因。渍水胁迫下, 氮肥后移处理改善了穗位叶光合性能, 光合能力优于氮肥前移处理。在苗期易导致渍害的地区适当减少基肥比例, 后移氮素至拔节期和大喇叭口期, 能够对受渍夏玉米起到较好的补偿生长效应。

关键词: 夏玉米; 渍水; 氮肥后移; 根系生长; 光合特性
中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)07-1008-08

Postponed nitrogen application enhances root morphology recovery and photosynthetic characteristics of summer maize waterlogging stressed at seedling stage*

WU Wenming, WANG Shiji**, CHEN Hongjian, CUI Quanren, JING Lili

(Tobacco Research Institute / Maize Research Center, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Maize is one of the main summer crops in Anhui Province. However, maize production in this region is often subjected to waterlogging stress at seedling stage. Nitrogen (N) is a key nutrient that influencing growth, yield and quality of

* 安徽省农业科学院学科建设基金项目(16A0927, 15A0926)资助
** 通讯作者: 王世济, 主要研究方向为玉米栽培生理。E-mail: wangymzx@163.com
武文明, 主要研究方向为作物生理生态。E-mail: wuwm1126@163.com
收稿日期: 2016-10-26 接受日期: 2017-03-03
* This work was supported by the Discipline Construction Program of Anhui Academy of Agricultural Sciences (16A0927, 15A0926).
** Corresponding author, E-mail: wangymzx@163.com
Received Oct. 26, 2016; accepted Mar. 3, 2017

maize, but what role it plays in relieving waterlogging stress on summer maize remains unclear. Thus field experiments were carried out to determine the effect of N application on the recovery of root morphology and photosynthetic characteristics of summer maize cultivar 'Longping 206' after waterlogging stress at seedling stage. Under both waterlogging and control (normal water) conditions, four treatments of different N application rates at land preparation, jointing stage, and big flare stage (N1: 10∶0∶0; N2: 7∶3∶0; N3: 5∶5∶0 and N4: 3∶5∶2) were set with a total N amount of 240 kg·hm^{-2}. The results showed that waterlogging stress at seedling stage significantly inhibited maize root growth. Root weight, length, surface area and diameter significantly decreased compared with those of the control. The degree of inhibiting effect on root morphology was in the order of total root length > root surface area > root diameter. Delayed N application had a compensation effect on root growth after waterlogging. Eighteen days after waterlogging, total root length of N1 to N4 treatments increased by 1.9–5.1 folds that before waterlogging. Root surface area and diameter increased by 6.3–10.3 folds and 0.7–1.0 folds, respectively. The degree of compensation effect of delayed N application on root morphology was in the order of root surface area > total root length > root diameter. Waterlogging stress at seedling stage significantly decreased leaf area index (LAI) at spinning stage by a range of 9.3%–22.5%. Compared with N1 treatment, N2, N3 and N4 treatments increased LAI within 3.2%–20.7% under waterlogging treatment. Waterlogging induced a noticeable decline in P_n, respectively by 16.1% and 28.9% compared with the control at mid grain-filling and late grain-filling stages. At late grain-filling stage, P_n decreased faster than that of control. Under waterlogging stress, non-stomatal restriction was the main factor driving the decline of photosynthetic capacity. Moreover, delayed N application improved photosynthetic capacity of ear leaf, which photosynthetic capacity was better than basal N application. In conclusion, the morphological characteristics of root and leaf along with the photosynthetic characteristics of maize under waterlogging responded positively to delayed N supplication. Therefore to improve the growth of maize in the study area (which could be affected by waterlogging at seedling stage), it was recommended to apply N at jointing and big-flare stages.
Keywords: Summer maize; Waterlogging; Delayed nitrogen application; Root growth; Photosynthetic characteristics

玉米(*Zea mays*)是安徽省江淮地区增产潜力大的粮食作物，由于苗期正值江淮地区的梅雨季节，易发生苗期渍害。玉米苗期遇到连续降雨或洪涝灾害造成土壤渍水，影响植株的正常生长发育[1-3]，苗期渍害已成为制约玉米高产稳产的一个重要的非生物胁迫因子[4-5]。玉米苗期渍水，根系长期处于低氧状态，导致根系活力降低，矿质元素吸收减少，干物质积累大幅度下降[5-6]。研究表明土壤渍水，叶片气孔关闭，蒸腾速率下降，光合速率降低，随着渍水时间的延长，叶绿素含量和光合作用相关功能酶活性下降，PS II 光化学效率降低，叶片早衰[7-9]。

氮素对玉米器官建成具有重要作用，施氮后增产效果明显[10]。张起君[11]研究发现，合理施肥在玉米增产诸因素中起 28%~30%的作用。土壤中的氮素和施入农田中的氮素必须经根系吸收才能进入作物体内，因此，根系生长性状与肥料吸收密切相关。Yu 等[12]研究表明局部高浓度硝酸盐处理能够诱导根系侧根长度的增加，且能够增加植株氮素吸收量。牛晓丽等[13]研究表明水氮双重胁迫后局部恢复氮素供应，根系氮素吸收速率在时间和空间上均可得到恢复；因此合理的氮素供应使得根系较好生长。根系的生长代谢和活力变化可直接影响到地上部的生长发育。渍害后植株光合性能下降[14]，合理的氮肥运筹能改善作物光合特性。较高的施氮水平能维持低氮敏感品种花后叶片光合速率和全氮含量[15]。氮肥供应不足降低叶片叶绿素含量，加速叶片死亡[16]；氮肥亏缺条件下增施氮肥可以改善叶片光合性能和气孔限制等[17]，提高 PS II 系统实际光化学量子产量，减轻渍害导致的光抑制和光损伤[8]，且氮肥后移能够减轻苗期渍害对夏玉米产量的影响[5]。以往关于根系研究多集中于干旱胁迫情况下，关于苗期渍害逆境下夏玉米植株根系特征如何变化，氮肥后移对苗期受渍夏玉米根系和光合特性有何影响研究尚不深入。为此，本文通过开展田间试验，研究不同氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米根系特征和光合生理特性的影响，以期明确氮肥对苗期受渍夏玉米根系和冠层生长发育的调控效应。

1　材料与方法

1.1　试验区基本情况

试验于 2014—2015 年在安徽省农业科学院合肥岗集基地(31°57′27.7″N, 117°11′51.81″E)进行。供试土壤为黏盘黄褐土，0~20 cm 土层含有机质 21.6 g·kg^{-1}、水解氮 118.4 mg·kg^{-1}、速效钾 269.6 mg·kg^{-1} 和速效磷 25.4 mg·kg^{-1}。2014 年 6—9 月平均气温 23.5 ℃，降雨量 734 mm; 2015年6—9月平均气温25.7 ℃，降水量794 mm。

1.2　试验设计

供试玉米品种为'隆平 206'，密度为 75 000 株·hm^{-2}。

设置玉米苗期 4~5 叶期渍水 7 d 处理, 其间保持田面 1~2 cm 的水层, 渍水期间无降水; 未渍水处理为对照。渍水处理和对照均设 4 个氮肥运筹方式, 分别为氮肥全部基施(N1)、基肥 70%+拔节肥 30%(N2)、基肥 50%+拔节肥 50%(N3)和基肥 30%+拔节肥 50%+大喇叭口肥 20%(N4), 渍水胁迫解除后 2 d 撒施拔节肥; 大喇叭口期追施大喇叭口肥(开沟撒施覆土)。全生育期纯氮总施用量为 240 kg·hm^{-2}, 氮肥种类为尿素。各小区于播种前施 P_2O_5 112.5 kg·hm^{-2}、K_2O 112.5 kg·hm^{-2}, 撒施于地表后耕翻入土。

采用裂区设计, 渍水处理为主区, 氮肥处理为副区, 重复 4 次, 小区面积 3.6 m×6.0 m, 各小区间隔 50 cm。渍水处理时, 深挖 50 cm 埋不透水塑料布阻止各小区水分的流动。其余栽培管理同高产大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 根系形态特征测定

于渍水处理前 1 d、渍水处理 3 d、渍水处理 7 d 和渍水胁迫解除 7 d、18 d 取根系, 取根时以植株为中心, 距离植株 40 cm 处深挖 40 cm, 每小区 4 株, 4 次重复。根系取出后, 用细水流冲洗干净, 剔除死根和杂物后, 用蒸馏水漂洗干净, 105 ℃杀青 30 min, 80 ℃烘干至恒重。使用台式扫描仪和 WinRHIZO 根系分析系统测定单位体积的根长度(cm)、根表面积(cm^2)和根直径(mm)。

1.3.2 叶面积系数测定

于吐丝期测定群体叶面积系数, 每小区随机取样 1 株, 4 次重复, 采用直尺测定叶片长度和最大宽度, 叶面积=叶片最大长度×最大宽度×0.75。

1.3.3 叶片光合速率测定

利用 Li-6400 便携式光合作用测定系统, 设定人工光源光强 1 500 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 于灌浆中期和灌浆末期晴天 9:00—11:30, 选取生长进程和生长方向一致的植株, 测定穗位叶净光合速率[P_n, μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}]、气孔导度(G_s, mmol·m^{-2}·s^{-1})、胞间 CO_2 浓度(C_i, μmol·mol^{-1})、蒸腾速率[T_r, mmol(H_2O)·m^{-2}·s^{-1}], 每小区 2 株, 4 次重复。

1.4 数据处理及统计分析

采用 Microsoft Excel 2003 计算数据; 采用 SPSS 13.0 对渍水和氮肥运筹方式进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米根系形态特征的影响

2.1.1 根重

苗期渍水, 玉米根系生长受到明显抑制, 渍水处理根重显著低于对照。渍水期间, N1-N4 处理根重无显著差异; 渍水胁迫解除后追施拔节肥, N2-N4 处理显著高于 N1。渍水胁迫解除 7 d, N1-N4 根重较对照分别下降 68.6%、41.1%、39.1%和 44.9%(图 1)。

2.1.2 根长度

对照处理, 生育前期 N1 和 N2 处理根长度显著高于 N3 和 N4; 追施拔节肥后 16 d(渍水胁迫解除后 18 d), N3 和 N4 处理根长度显著高于 N1。苗期渍害 7 d 抑制根系生长, 随渍水时间的延长, 根长度较渍水前下降幅度增大。渍水 3 d, N1-N4 处理根长度较渍水前分别下降 16.9%、13.2%、0.6%和 1.1%; 渍水 7 d, N1-N4 根长度分别下降 55.4%、55.4%、24.9%和 34.6%。渍水胁迫解除后追施拔节肥, N3 和 N4 处理根长度恢复速度优于 N1 和 N2。胁迫解除 7 d, N3 和 N4 处理根长度均高于渍水前; 胁迫解除 18 d, N1-N4 处理均已恢复生长, 较渍水前提高 1.9 倍、2.3 倍、4.4 倍和 5.1 倍(图 1)。表明渍水胁迫后追施拔节肥, 有利于根长度的快速恢复。

不同氮肥处理间, 渍水前 N1 处理根长度显著高于 N3 和 N4; 渍水 7 d, 不同氮肥处理间根长度无显著差异。胁迫解除后 7 d, N4 处理根长度较 N1、N2 和 N3 处理分别高 13.4%、12.9%和 5.4%。渍水胁迫解除 18 d, N4 处理根长度较 N1、N2 和 N3 处理高 15.6%、8.2%和 18.0%。表明氮肥后移对渍水后根长度起到恢复生长的效应。

2.1.3 根表面积

苗期渍害 7 d 降低根表面积, 降低趋势同根长度下降趋势相同, 但下降幅度小于根长度。随渍水时间延长, 降低幅度增大。渍水 3 d, N1-N4 处理较渍水前根表面积分别下降 9.2%、10.0%、11.8%和 10.7%; 渍水 7 d, 分别下降 35.6%、39.9%、12.8%和 30.4%。渍水胁迫解除后追施拔节肥根表面积恢复, 恢复速度较根长度快; 渍水胁迫解除 18 d, 根表面积较渍水处理前分别增大 6.3 倍、7.1 倍、10.6 倍和 10.6 倍。表明渍水胁迫后追施拔节肥, 根表面积对氮素后移的响应速度较根长度快。

不同氮素处理间, 渍水前 N1 根表面积显著高于 N3 和 N4; 随渍水时间延长, N1-N4 处理间根表面积无显著差异。胁迫解除 7 d, 根表面积表现为 N4>N2>N3>N1, N4 高于 N1-N3 处理 29.5%、20.7% 和 25.8%。胁迫解除 18 d, N4 高于 N1-N3 处理 10.7%、4.4%和 6.1%, 表明胁迫解除后, N4 处理根表面积恢复速度高于 N1-N3 处理。与对照相比, 渍水 7 d, 渍水处理 N1-N4 根表面积较对照分别下降 42.0%、

13.7%、47.2%和 67.9%。渍水胁迫解除后 7 d, N1-N4 较对照分别下降 34.8%、27.8%、27.4%和 10.2%; 渍水胁迫解除 18 d, 分别下降 3.8%、4.7%、5.6%和 4.0%。表明随着胁迫解除追施拔节肥, 利于根表面积的恢复, 与对照处理差异缩小, 但仍低于对照处理。

2.1.4　根直径

对照处理, 追施拔节肥前, N1 处理根直径显著高于 N2-N4(图 1); 追施拔节肥后, N4 和 N3 处理显著高于 N1。渍水处理 7 d, 根直径与渍水前无显著差异。渍水胁迫解除后 18 d, 不同氮肥处理间根直径无显著差异, 但较渍水前分别提高 0.7 倍、0.8 倍、0.7 倍和 1.0 倍; 且 N4 处理较 N1-N3 处理根直径分别提高 10.9%、4.4%和 10.9%。表明渍水胁迫后根直径恢复速度慢于根长度和根表面积。

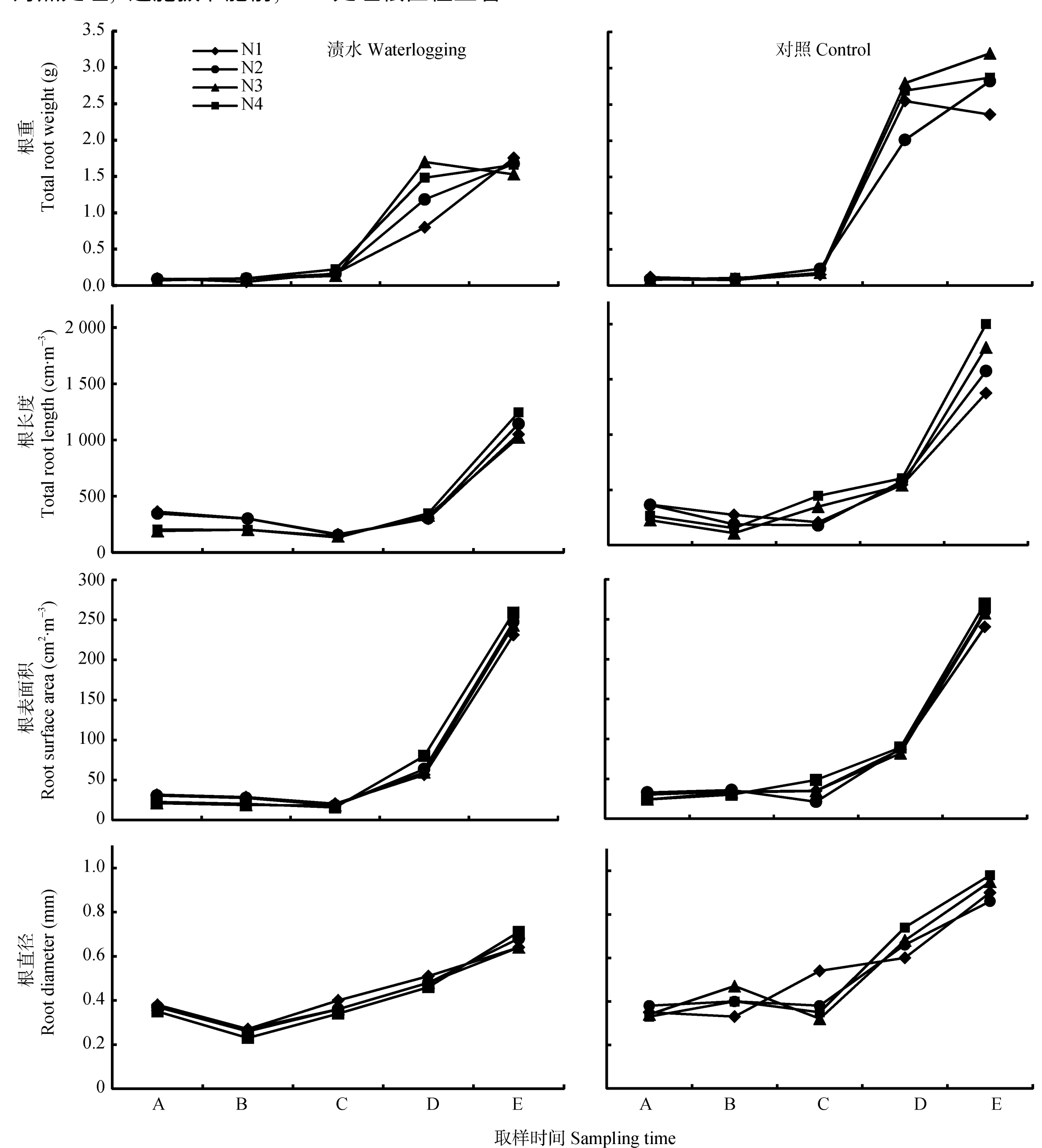


图 1　氮肥运筹模式对苗期受渍夏玉米根重和形态特征的影响(**2015** 年)

Fig. 1　Effect of nitrogen fertilization mode on root dry weight and morphological characteristics of summer maize under waterlogging at seedling stage (2015)

A: 渍水前 1 d; B: 渍水 3 d; C: 渍水 7 d; D: 渍水胁迫解除 7 d; E: 渍水胁迫解除 18 d。N1: 氮肥全部基施; N2: 基肥 70%+拔节肥 30%; N3: 基肥 50%+拔节肥 50%; N4: 基肥 30%+拔节肥 50%+大喇叭口肥 20%。A: 1 day before waterlogging; B: the 3rd day of waterlogging; C: the 7th day of waterlogging; D: 3 days after waterlogging relieved; E: 18 days after waterlogging relieved. N1: 100% N for basal fertilizer application; N2: 70% N for basal + 30% N for jointing stage application; N3: 50% N for basal + 50% N for jointing stage application; N4: 30% N for basal + 50% N for jointing stage application + 20% N for big flare stage application.

2.2 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米群体叶面积系数的影响

苗期渍水抑制叶片的生长，渍水处理 LAI 显著低于对照处理。2014 年，吐丝期渍水处理 N1–N4 较对照分别下降 15.3%、13.5%、13.3%和 10.0%; 2015 年渍水处理 N1–N4 较对照分别下降 22.5%、20.2%、17.0%和 9.3%(图 2)。苗期渍水影响玉米植株叶片生长，降低群体绿叶面积，不利于玉米光合生产。

2014 年，渍水条件下 N4 处理 LAI 显著高于其他氮肥处理，氮肥后移提高吐丝期 LAI。2014 年，渍水处理 N3 和 N4 较 N1 提高 3.2%和 6.7%，对照 N3 和 N4 较 N1 提高 0.8%和 0.4%; 2015 年，渍水处理 N3 和 N4 较 N1 提高 3.8%和 20.7%，对照 N4 较 N1 提高 3.1%。

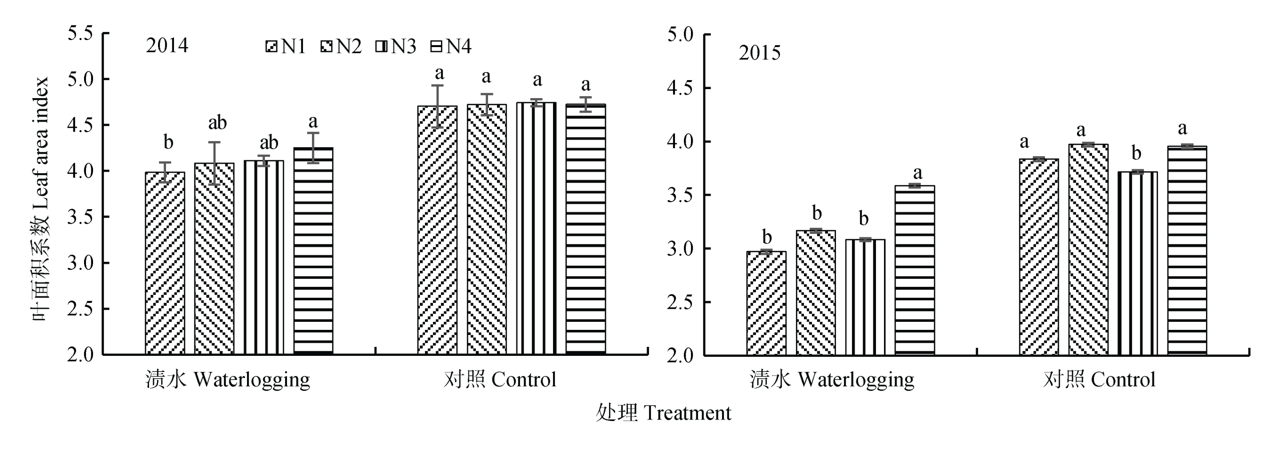


图 2　2014 年和 2015 年氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米吐丝期 LAI 的影响

Fig. 2　Effect of nitrogen fertilization mode on leaf area index (LAI) at spinning stage of summer maize under waterlogging at seedling stage in 2014 and 2015

N1：氮肥全部基施；N2：基肥 70%+拔节肥 30%；N3：基肥 50%+拔节肥 50%；N4：基肥 30%+拔节肥 50%+大喇叭口肥 20%。柱上不同小写字母表示不同氮肥处理间 LAI 存在显著差异($P<0.05$)。N1: 100% N for basal fertilizer application; N2: 70% N for basal + 30% N for jointing stage application; N3: 50% N for basal + 50% N for jointing stage application; N4: 30% N for basal + 50% N for jointing stage application + 20% N for big flare stage application. Different letters above bars indicate significant differences among different nitrogen treatments at $P < 0.05$.

2.3 氮肥运筹方式对苗期受渍夏玉米光合特性的影响

渍水处理显著降低穗位层叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率。灌浆中期和灌浆末期净光合速率、气孔导度和蒸腾速率分别较对照下降 16.1%和 28.9%、25.0%和 12.1%、5.1%和 10.9%。胞间 CO_2 浓度变化规律则相反，较对照分别上升 19.3%和 61.3%。灌浆中期和末期两次光合参数分析表明，渍水处理灌浆末期净光合速率、气孔导度和蒸腾速率较灌浆中期分别下降 38.9%、31.1%和 21.8%; 对照分别下降 27.9%、41.2%和 16.8%(表 1)，渍水处理净光合速率和蒸腾速率下降幅度高于对照。

灌浆中期不同氮肥处理间穗位层叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率无显著差异。灌浆末期 N4 处理净光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著高于 N1 和 N2。渍水处理，灌浆末期 N4 处理净光合速率、气孔导度和蒸腾速率较 N1 和 N2 处理分别提高 63.3%和 55.3%、43.2%和 7.0%、34.5%和 12.3%(表 1)，表明氮肥后移提高灌浆后期穗位层叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率。

3　讨论

根系是植物吸收水分和养分的主要器官，根系形态和空间分布影响养分吸收。合理施肥可营造良好的根际土壤环境，保证玉米根际养分的有效供应[18]。氮肥促进根系生长，增加根毛密度，增强根系生理功能[19]。10 叶展追氮提高 0~20 cm 土层中根重和根表面积分布；吐丝期追氮可提高根系在 20~40 cm 土层中分布和根系活力[20]。本研究结果表明，正常供水条件下，随着基肥施氮的减少，苗期根重、根长度、根表面积无明显变化，但追施拔节肥后，根系形态指标均快速提升。氮肥后移至大喇叭口期和吐丝期可使耕层无机氮供应较好地与作物吸收同步[21]。适宜的施氮量与追肥时期的耦合效应可实现夏玉米产量和品质的同步提升，且大幅度降低土壤硝态氮淋溶[22]。苗期渍害逆境下玉米根系生长不同于正常供水处理，苗期渍害抑制了玉米根系的生长，根系干物质积累大幅度下降；根长度、根表面积、根直径均显著降低，这可能是由于渍水后玉米主胚根和次生根生长均受到抑制，根系变粗变短，分叉减少，几乎没有根毛，且一部分根系窒息死亡[6]，从而导

表 1　不同氮肥运筹方式对苗期受渍灌浆中后期玉米光合特性的影响(2015 年)

Table 1　Effect of nitrogen fertilization mode on photosynthetic characteristics at mid and late grain-filling stages of summer maize under waterlogging at seedling stage (2015)

氮肥处理 Treatment of nitrogen fertilzation	净光合速率 Net photosynthetic rate ($\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)		气孔导度 Stomatal conductance ($mmol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)		胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration ($\mu mol\cdot mol^{-1}$)		蒸腾速率 Transpiration rate ($mmol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$)	
	渍水 Waterlogging	对照 Control	渍水 Waterlogging	对照 Control	渍水 Waterlogging	对照 Control	渍水 Waterlogging	对照 Control
灌浆中期 Mid grain-filling stage								
N1	20.2±1.9a	25.8±2.3a	148.0±30.0a	180.4±3.8b	180.7±10.8a	104.8±25.9a	3.5±0.2a	3.9±0.2a
N2	23.3±2.6a	26.5±4.2a	153.0±33.4a	195.6±32.1ab	79.4±26.1b	60.6±3.3b	3.2±0.5a	3.8±0.7a
N3	19.9±3.4a	25.3±0.6a	162.2±29.2a	229.3±70.0ab	72.6±9.7b	79.8±13.0ab	3.9±0.5a	3.6±0.4a
N4	24.9±2.0a	27.7±1.0a	167.9±29.8a	236.1±6.3a	74.4±19.4b	84.4±11.5a	4.0±0.2a	4.0±0.5a
平均 Average	22.1±1.2B	26.3±0.5A	157.8±4.5B	210.3±13.3A	101.8±26.3A	85.3±9.7B	3.6±0.2A	3.8±0.1A
灌浆末期 Late grain-filling stage								
N1	11.0±2.0b	12.4±2.4b	85.3±14.5b	98.7±13.5b	155.4±12.0a	138.9±19.3a	2.4±0.3b	2.8±0.3b
N2	11.6±2.9b	20.6±0.8a	114.1±20.8a	121.9±11.9a	157.1±4.4a	53.8±19.9b	2.9±0.4a	3.4±0.3a
N3	13.4±1.5ab	20.5±2.7a	113.2±3.0a	128.2±38.5a	118.5±8.0b	56.7±37.1b	2.8±0.3ab	3.1±0.6ab
N4	18.0±0.2a	22.4±2.9a	122.1±14.8a	145.8±15.0a	80.2±26.0c	67.4±4.4b	3.3±0.4a	3.5±0.2a
平均 Average	13.5±1.6B	19.0±2.3A	108.7±8.1B	123.7±9.7A	127.8±18.2A	79.2±20.1B	2.8±0.2A	3.2±0.2A

N1：氮肥全部基施；N2：基肥 70%+拔节肥 30%；N3：基肥 50%+拔节肥 50%；N4：基肥 30%+拔节肥 50%+大喇叭口肥 20%。不同小写字母表示不同氮肥处理间在 P<0.05 水平上差异显著；不同大写字母表示渍水和对照间在 P<0.05 水平上差异显著。N1: 100% N for basal fertilizer application; N2: 70% N for basal + 30% N for jointing stage application; N3: 50% N for basal + 50% N for jointing stage application; N4: 30% N for basal + 50% N for jointing stage application + 20% N for big flare stages application. Values followed by different lowercase letters indicate significant differences (P < 0.05) among different nitrogen treatments. Values followed by capital letters indicate significant differences (P < 0.05) between waterlogging and control treatment.

致根长度和根表面积降低，其中根长度较渍水前下降 24.9%~55.4%，根表面积下降 12.8%~39.9%，根直径下降 2.7%~5.3%，3 个形态指标受渍水抑制程度大小为：根长度>根表面积>根直径，这与梁哲军等[6]研究结果一致。渍水胁迫解除后追施氮肥，改善土壤肥力，促进根系生长，根系恢复生长能力较全部基施处理强，氮素后移对渍水后根系形态指标恢复生长的补偿效应强弱表现为：根表面积>根长度>根直径。氮素供应对玉米根系的生长和形态、分布、生理及分泌等有明显影响[23]。施氮主要通过提高表土层根系鲜重、根系总鲜重与总干重及中下层根系含氮量实现夏玉米增产[24]。生育前期少量供氮对根系生长无抑制作用，而供氮水平进一步提高，则对根系生长有抑制作用[23,25]。因此，基施氮肥比例相对降低，对植株的生长并没有抑制作用，氮素施用量相对后移至拔节期和大喇叭口期能够保证后期充足的氮素供应，且对渍害后根系恢复生长起到很好的补偿效应。因此，在玉米苗期降水过多地区，降水造成大量氮素以 NO_3^--N 形式淋溶到土壤深处，且夏玉米前期生长较慢，若生育前期投入过多氮肥，易导致严重的氮素淋洗，造成玉米生育后期氮素供应不足现象[5]，因此该地区应采取氮素后移的运筹方式，保证氮素供应与作物吸收同步。

氮肥后移可明显改善作物生长中后期叶片光合性能。作为植物吸收水分和养分以及合成植物激素的器官，根系的生长代谢和活力变化可直接影响到地上部的生长发育，并影响地上部“光系统”的建成和产量形成[26-27]。渍水导致植株下部发黄叶片脱落，叶面积扩张和新叶抽出均受抑制，叶型窄而薄[6]。渍水处理导致下部叶片的死亡，使得群体叶面积系数降低。氮肥后移通过提高作物生长中后期土壤中矿质态氮含量，增加根部的细胞分裂素合成和向叶的运输[28]，增大穗位层和穗上层叶片的 LAI 来弥补穗下层 LAI 降低导致的群体 LAI 降低的趋势，且弥补的效应大于渍害导致穗下层 LAI 降低的效应，进而使得苗期渍害下氮肥后移的群体 LAI 较氮肥前移增大[5]。

光合作用是作物干物质和产量形成的基础[15]。有研究认为气孔限制是玉米淹水 7 d 植株光合速率下降的主要因素，而非气孔限制则是淹水 14 d 植株光合速率下降的主要因素[6]。本研究结果表明，苗期渍水 7 d，灌浆期间穗位叶片的净光合速率下降，且生育后期下降幅度较快。与对照相比，渍水 7 d 灌浆期净光合速率、气孔导度降低，但胞间 CO_2 浓度高于对照处理，表明苗期渍水后，灌浆期间穗位叶净光合速率下降并不主要是由气孔导度引起，可能是

由叶肉细胞羧化能力降低的缘故[5,8]。渍水胁迫后植株生长受到抑制，根系活力下降，叶片早衰，叶绿素含量降低和叶面积减小，光合作用受抑制进而净光合速率下降，最终可导致减产超 20%[5-6,9,14]。氮素同样影响植株光合效率，氮素供应不足是影响作物产量的首要因素[17,29-30]。氮素供应不足影响 Rubisco 和 PEPC 酶活性，酶活性降低导致灌浆后期净光合速率下降。表明基施氮肥比例相对降低，氮素后移至拔节期和大喇叭口肥能够通过增大穗位层和穗上层叶片的LAI来弥补穗下层LAI降低导致的群体LAI降低的趋势，延长叶片光合功能期，提高光能截获能力，改善灌浆期群体光合性能，进而使得氮素后移处理植株光合能力较氮肥前移处理提高。

4 结论

苗期渍水抑制根系生长，胁迫解除后追施氮肥，对根系的生长有明显的补偿效应。苗期渍水显著降低灌浆期间穗位叶片的光合能力，净光合速率下降，且灌浆后期光合能力下降较对照处理快，非气孔限制是导致渍水胁迫下净光合速率下降的主要原因。在苗期易发生渍害的地区，在施氮运筹上采取基肥和后期追肥相结合及适当增加后期施氮比例的适应性的氮素管理策略，能够对受渍夏玉米起到较好的补偿生长效应。

参考文献 References

[1] 郭庆法. 中国玉米栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2004: 497–500, 767
Guo Q F. Maize Cultivation in China[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2004: 497–500, 767

[2] 李瑞秋, 高小彦, 吴敦肃. 淹水对玉米苗某些生理和形态的影响[J]. 植物学报, 1991, 33(6): 473–477
Li R Q, Gao X Y, Wu D S. Some physiological and morphological responses in flooded maize[J]. Acta Botanica Sinica, 1991, 33(6): 473–477

[3] Rai R K, Srivastava J P, Shahi J P. Effect of waterlogging on some biochemical parameters during early growth stages of maize[J]. Indian Journal of Plant Physiology, 2004, 9(1): 65–68

[4] 陈国平, 赵仕孝, 杨洪友, 等. 玉米的涝害及其防御措施的研究Ⅰ、芽涝对玉米出苗及苗期生长的影响[J]. 华北农学报, 1988, 3(2): 12–17
Chen G P, Zhao S X, Yang H Y, et al. Studies on waterlogging of corn and protection measures Ⅰ. Effects of waterlogging at bud bursting stage on the emergence and early growth of seedlings of corn[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 1988, 3(2): 12–17

[5] 武文明, 陈洪俭, 王世济, 等. 氮肥运筹对苗期受渍夏玉米干物质和氮素积累与转运的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(8): 1246–1256
Wu W M, Chen H J, Wang S J, et al. Effects of nitrogen fertilization application regime on dry matter, nitrogen accumulation and transportation in summer maize under waterlogging at the seedling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(8): 1246–1256

[6] 梁哲军, 陶洪斌, 王璞. 淹水解除后玉米幼苗形态及光合生理特征恢复[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3977–3986
Liang Z J, Tao H B, Wang P. Recovery effects of morphology and photosynthetic characteristics of maize (*Zey mays* L.) seedlings after water-logging[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3977–3986

[7] Holá D, Benešová M, Honnerová J, et al. The evaluation of photosynthetic parameters in maize inbred lines subjected to water deficiency: Can these parameters be used for the prediction of performance of hybrid progeny[J]. Photosynthetica, 2010, 48(4): 545–558

[8] Wu W M, Li J C, Chen H J, et al. Effects of nitrogen fertilization on chlorophyll fluorescence change in maize (*Zea mays* L.) under waterlogging at seedling stage[J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2013, 11(1): 545–552

[9] 任佰朝, 张吉旺, 李霞, 等. 大田淹水对夏玉米叶片衰老特性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1022–1028
Ren B C, Zhang J W, Li X, et al. Effect of waterlogging on leaf senescence characteristics of summer maize in the field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(4): 1022–1028

[10] 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(2): 339–347
Wang Y L, Li C H, Tan J F, et al. Effect of postponing N application on yield, nitrogen absorption and utilization in super-high-yield summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(2): 339–347

[11] 张起君. 玉米高产开发原理与技术[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1992
Zhang Q J. The principle and technology of high yield corn development[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1992

[12] Yu P, Li X X, Yuan L X, et al. A novel morphological response of maize (*Zea mays*) adult roots to heterogeneous nitrate supply revealed by a split-root experiment[J]. Physiologic Plantarum, 2014, 150(1): 133–144

[13] 牛晓丽, 胡田田, 张富仓, 等. 局部恢复水氮供应对玉米根系氮素吸收与分配的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(14): 2737–2750
Niu X L, Hu T T, Zhang F C, et al. Effects of partial water and nitrogen resupplies on maize root nitrogen absorbing capacity and distribution[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(14): 2737–2750

[14] Ren B Z, Dong S T, Liu P, et al. Ridge tillage improves plant growth and grain yield of waterlogged summer maize[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 392–399

[15] 李强, 马晓君, 程秋博, 等. 氮肥对不同耐低氮性玉米品种

花后物质生产及叶片功能特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 17–26
Li Q, Ma X J, Cheng Q B, et al. Effects of nitrogen fertilizer on post-silking dry matter production and leaves function characteristics of low-nitrogen tolerance maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(1): 17–26
[16] Massignam A M, Chapman S C, Hammer G L, et al. Effects of nitrogen supply on canopy development of maize and sunflower[J]. Crop and Pasture Science, 2011, 62(12): 1045–1055
[17] Wei S S, Wang X Y, Shi D Y, et al. The mechanisms of low nitrogen induced weakened photosynthesis in summer maize (*Zea mays* L.) under field conditions[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2016, 105: 118–128
[18] 张学林, 徐钧, 安婷婷, 等. 不同氮肥水平下玉米根际土壤特性与产量的关系[J]. 中国农业科学, 2016, 49(14): 2687–2699
Zhang X L, Xu J, An T T, et al. Relationship between rhizosphere soil properties and yield of maize at different nitrogen levels[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(14): 2687–2699
[19] 杜红霞, 冯浩, 吴普特, 等. 水、氮调控对夏玉米根系特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1): 89–94
Du H X, Feng H, Wu P T, et al. Influence of water and N fertilizer regulation on root growth characteristics of summer maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(1): 89–94
[20] 王启现, 王璞, 杨相勇, 等. 不同施氮时期对玉米根系分布及其活性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1469–1475
Wang Q X, Wang P, Yang X Y, et al. Effects of nitrogen application time on root distribution and its activity in maize (*Zea mays* L.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(12): 1469–1475
[21] 赵士诚, 裴雪霞, 何萍, 等. 氮肥减量后移对土壤氮素供应和夏玉米氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 492–497
Zhao S C, Pei X X, He P, et al. Effects of reducing and postponing nitrogen application on soil N supply, plant N uptake and utilization of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 492–497
[22] 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 129–138
Yin M H, Li Y N, Li H, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 129–138
[23] 张玉, 秦华东, 伍龙梅, 等. 玉米根系生长特性及氮肥运筹对根系生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(6): 62–70
Zhang Y, Qin H D, Wu L M, et al. Growth characteristics and the effect of nitrogen application on the maize root[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(6): 62–70
[24] 易镇邪, 王璞, 屠乃美. 夏播玉米根系分布与含氮量对氮肥类型与施氮量的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 91–98
Yi Z X, Wang P, Tu N M. Responses of roots distribution and nitrogen content of summer maize to nitrogen fertilization types and amounts[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 91–98
[25] 姜琳琳, 韩立思, 韩晓日, 等. 氮素对玉米幼苗生长、根系形态及氮素吸收利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 247–253
Jiang L L, Han L S, Han X R, et al. Effects of nitrogen on growth root morphological traits, nitrogen uptake and utilization efficiency of maize seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 247–253
[26] Wilkinson S, Davies W J. ABA-based chemical signalling: The co-ordination of responses to stress in plants[J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2): 195–210
[27] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant[J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(3): 239–264
[28] Song W J, Li J, Sun H W, et al. Increased photosynthetic capacity in response to nitrate is correlated with enhanced cytokinin levels in rice cultivar with high responsiveness to nitrogen nutrients[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1/2): 981–993
[29] Erley G S, Ambebe T F, Worku M, et al. Photosynthesis and leaf-nitrogen dynamics during leaf senescence of tropical maize cultivars in hydroponics in relation to N efficiency in the field[J]. Plant and Soil, 2010, 330(1/2): 313–328
[30] Zong Y Z, Shangguan Z P. Nitrogen deficiency limited the improvement of photosynthesis in maize by elevated CO_2 under drought[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(1): 73–81